

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 550.3:534.6:535.378

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ УДАРНОМ РАЗРУШЕНИИ ГРАНИТА

И. П. Щербаков, В. С. Куксенко, А. Е. Чмель

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, E-mail: chmel@mail.ioffe.ru,
ул. Политехническая, 26, 194021, Санкт-Петербург, Россия*

Неоднократно отмечалось, что закономерности возникновения и накопления трещин в горных породах имеют много общего в крупномасштабных геоструктурах и в лабораторных условиях. Данные экспериментов по деформации и разрушению лабораторных образцов часто используются для интерпретации природных сейсмических явлений. Однако обычно эти опыты проводятся при комнатной температуре, тогда как температура пород на глубине формирования очагов горных ударов и землетрясений может достигать нескольких сот градусов Цельсия. Чтобы оценить значение этого несоответствия, в настоящей работе получены временные ряды импульсов акустической эмиссии, генерируемых при возникновении микротрещин в гранитах, подвергнутых ударному разрушению при различной температуре. Выявлены существенные изменения в кинетике накопления повреждений и степени кооперативных эффектов в зависимости от температуры образцов в диапазоне от 20 до 600° С.

Динамическое разрушение, граниты, акустическая эмиссия, температурная зависимость

Результаты многих лабораторных экспериментов по разрушению горных пород методами акустической эмиссии (АЭ) свидетельствуют о достаточно близком подобии реальных и смоделированных в лаборатории процессов разрушения горных пород. Поскольку накопление гипоцентров и распространение трещин в деформированных горных породах сопровождается генерацией упругих волн в диапазоне акустических частот, данные, полученные методом АЭ, часто используются для интерпретации закономерностей природной сейсмической активности [1–6]. Однако эксперименты по деформированию геоматериалов осуществляются в условиях, не вполне адекватных реальным условиям сейсмического процесса, поскольку на глубине десятков километров, где происходит формирование очагов землетрясений, зарождение гипоцентров происходит при температуре, превышающей на несколько сот градусов температуру на поверхности земли.

Нерешенность проблемы несоответствия температурных условий известных нам лабораторных опытов и процессов в очагах развития горных ударов и землетрясений обуславливает необходимость исследования роли температуры геоматериала на характер накопления гипоцентров. Один из аспектов решения этой задачи рассматривается в настоящей работе, в которой получены и проанализированы временные последовательности импульсов АЭ из гранитов, генерируемых при разрушении образцов в нагретом состоянии (от комнатной температуры до 600 °С).

ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Объектами исследования служили образцы гранитов двух видов из финляндских карьеров — рапакиви и куру грей. Приблизительный химический состав материалов и некоторые физико-механические свойства приведены в таблице.

Состав и физико-механические свойства образцов гранитов

Гранит	Состав, %				Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Размер зерна, мм
	ортоклаз	олигоклаз	кварц	прочие			
Рапакиви	40	19	30	11	160	2660	3–5
Куру грей	38	20	31	11	297	2700	~ 2

Образцы вырезались в форме блоков размером примерно 15×20×20 мм. Схема опытов представлена на рис. 1а.

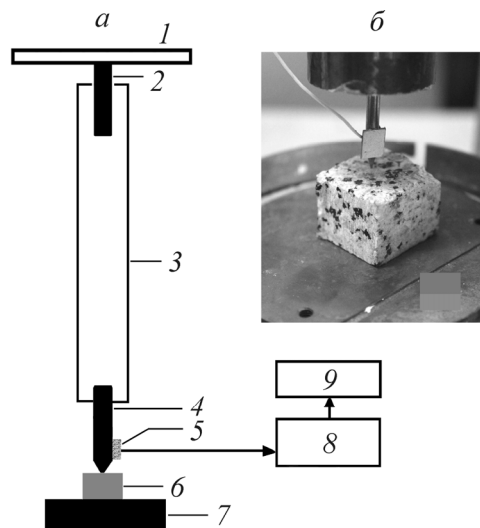


Рис. 1. Схема установки для регистрации АЭ при ударном разрушении (а) и фото заостренного бойка с прикрепленным пьезодатчиком, опирающимся на образец, установленный на нагреваемую подставку (б): 1 — электромагнит; 2 — груз; 3 — направляющий кожух; 4 — боек; 5 — пьезоэлемент; 6 — образец; 7 — нагреваемое основание; 8 — конвертер АЦП АСК-3106; 9 — ПК

Локализованное разрушение гранита проводилось грузом массой 100 г, падающим с высоты 10 см на стальной боек, установленный на поверхность образца (рис. 1б). Повреждение поверхности представляло собой лунку неправильной формы диаметром около 2 мм и глубиной ~ 0.5 мм.

Для регистрации АЭ на плоской боковой поверхности заостренного бойка прикрепляли пьезодатчик. Такая схема регистрации (в отличие от традиционной практики установки датчика на образец) обеспечивала необходимую теплоизоляцию пьезодатчика от нагретого образца.

Напряжение на выходе аналого-цифрового преобразователя записывалось в память компьютера с шагом 10 нс. Максимальная частота регистрируемых сигналов составляла 1 МГц. Низкочастотная цифровая фильтрация на уровне 50 кГц позволяла исключить как сигнал от первичной упругой волны, проходящей через боек, так и паразитные колебания образца и всей установки. Для исключения фонового акустического шума (например, за счет многократного отражения упругих волн от стенок образца) применялась дискриминация сигналов по амплитуде.

Образцы помещались на нагреваемое основание. Опыты проводились при температурах образцов от 20 до 600 °С, температура измерялась дистанционно с помощью инфракрасного пирометра CONDTRON IR-T4.

Отсчет времени временных разверток импульсов АЭ начинался с момента соприкосновения груза с бойком, поэтому полезный сигнал поступал в систему регистрации и обработки данных с запозданием 30–70 с за счет прохождения упругой волны через ударник в образец и ответных акустических сигналов до пьезодатчика.

При оценке надежности выводов работы необходимо принять во внимание следующее методическое замечание. Как правило, метод АЭ используется для изучения возникновения и развития микротрещин в горных породах под действием сжимающей деформации [3, 5–8]. Для решения задачи, поставленной в данной работе, компрессионная схема нагружения образцов была бы неоптимальной из-за неконтролируемого воздействия тепла на датчики АЭ, установленные на поверхности образца. Примененная схема ударного повреждения образцов исключала прямой контакт регистрирующих элементов с поверхностью гранита (см. рис. 1б). На предварительной стадии проводилось прямое сравнение кинетики накопления дефектов при компрессионном и динамическом разрушении. Найдено, что кривые накопления сигналов АЭ в обоих случаях качественно совпадают, несмотря на то что времена циклов разрушения различались на несколько порядков величины [9]. Это дает основание полагать, что выводы настоящего исследования, по крайней мере качественно, могут быть отнесены и к разрушению гранитов при сжатии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты проводились при 7 значениях температуры каждого образца. При обработке данных регистрировалось общее число импульсов АЭ во временных сериях (N) и определялась интенсивность каждого импульса, равная квадрату амплитуды сигнала. Также вычислялась средняя интенсивность в одном импульсе серии. В качестве примера оригинальных данных на рис. 2 показаны последовательности импульсов АЭ из двух видов гранита, записанные при трех различных температурах.

Подробные данные измерений для принятых значений температуры представлены на гистограммах рис. 3. Можно видеть, что зависимость от температуры суммарного числа импульсов АЭ, последовавших после удара, проявляет тенденцию к росту в диапазоне от 20 до 300–400 °С для обоих типов гранита. При более высоких температурах рост прекращается. Хотя большой разброс значений N в повторных опытах не позволяет делать точные оценки, на гистограммах можно видеть, что число зарегистрированных сигналов примерно удваивается в граните куру грей и возрастает в 4 раза в граните рапакиви.

Однако рост числа гипоцентров является экстенсивным показателем, так как даже большое количество мелких повреждений может быть менее опасным для стабильности образца, чем несколько более крупных трещин. Оценку интенсивности повреждения образца в каждой серии можно получить, подсчитав либо суммарную энергию, освободившуюся во всех сериях импульсов (то есть измерить суммарную интенсивность I , поскольку эти величины пропорциональны), либо среднюю энергию, приходящуюся на единичный импульс и пропорциональную средней интенсивности в импульсе $\bar{I} = I / N$. Результат такой обработки данных показан на рис. 4.

Температурные зависимости средней интенсивности импульсов АЭ демонстрируют монотонный рост энерговыделения в обоих типах гранита. Интересно, что значительные осцилляции числа импульсов в опытах, проведенных при различной температуре (рис. 3), совершенно не проявились на графиках для средней энергии в “событии разрушения” (рис. 4). Это означа-

ет, что более низкие значения суммарного числа импульсов АЭ характерны для “сильных” событий; при этом среднее энерговыделение за один импульс оказывается стабильным параметром в отличие от числа импульсов в серии.

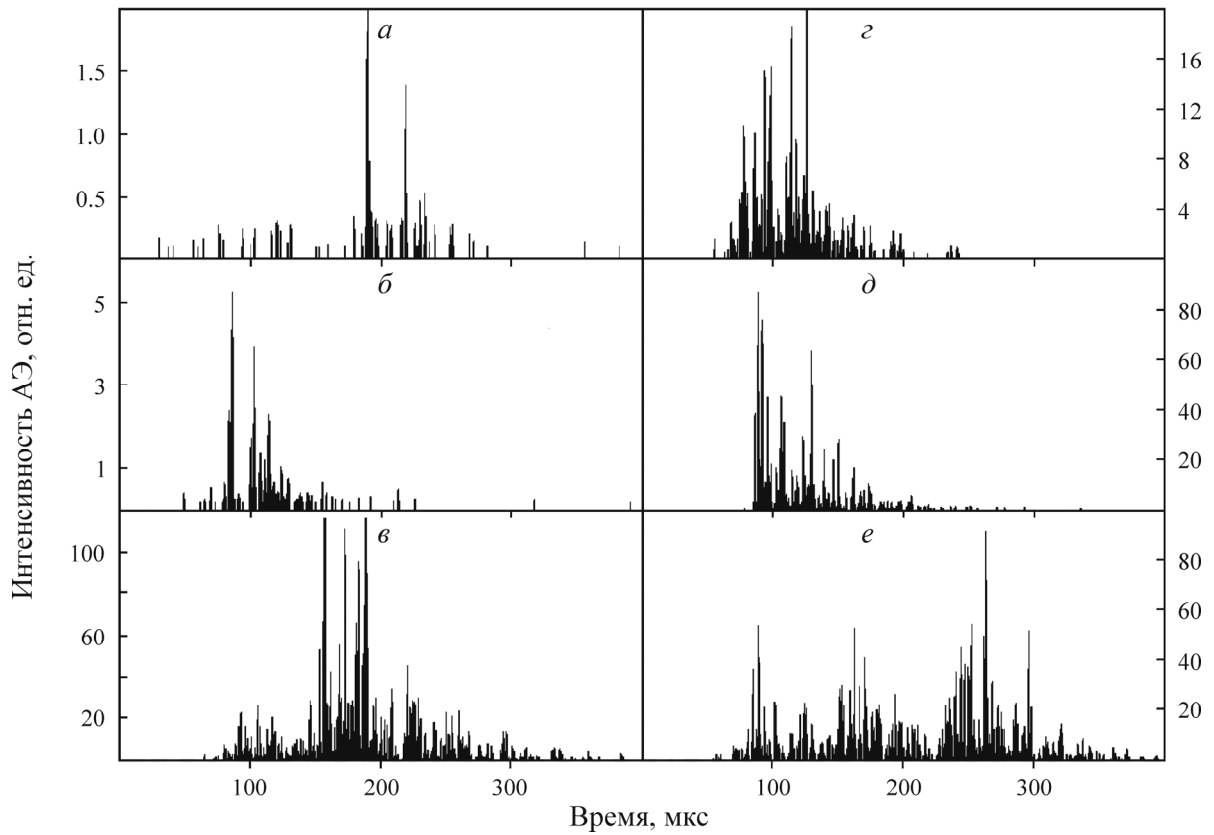


Рис. 2. Временные развертки интенсивности сигналов АЭ из гранитов рапакиви (*a–в*) и куру грей (*z–e*) при температурах образцов 20 °C (*a, z*), 200 °C (*б, д*) и 600 °C (*в, e*)

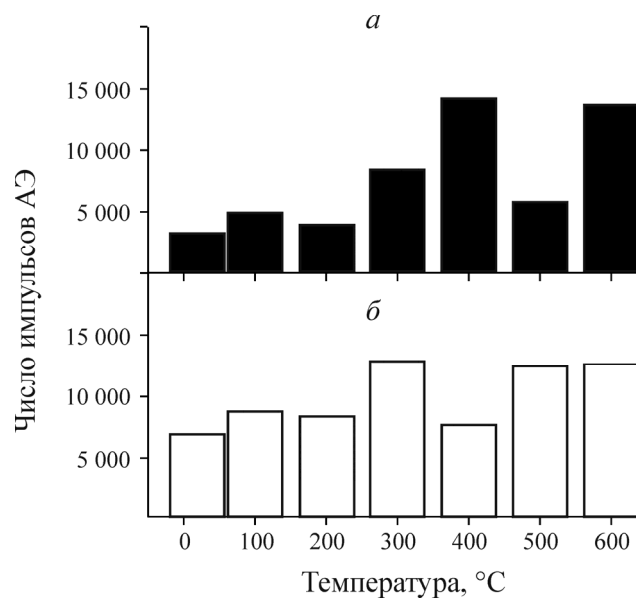


Рис. 3. Гистограммы суммарного числа АЭ импульсов из гранитов рапакиви (*a*) и куру грей (*б*) при различных температурах образцов

Сравнение величин \bar{I} между двумя типами гранита указывает на повышенную интенсивность разрушения (энерговыведения) в более прочном мелкозернистом граните куру грей. Такое соотношение сохраняется при всех температурах измерений. Это означает, что температурное изменение кинетики накопления повреждений в гранитах не зависит от химического состава и размера зерен материалов, которые (в определенных пределах) не чувствительны к температуре, а определяется, во-первых, общим для горных пород эффектом уменьшения упругих постоянных при нагревании, а во-вторых, снижением потенциального барьера термофлуктуационного разрыва химических связей [10].

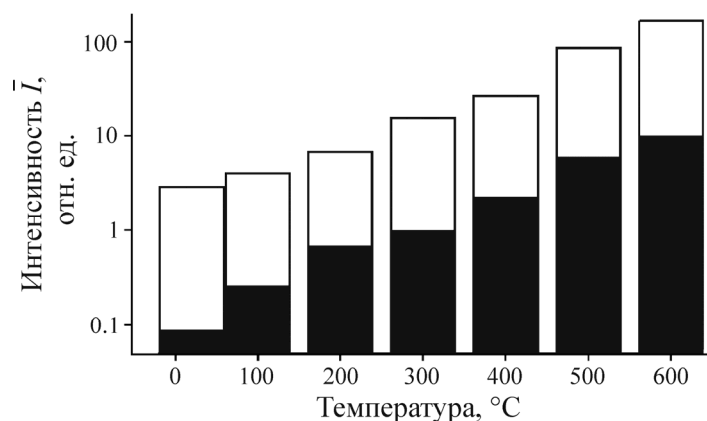


Рис. 4. Гистограммы средней интенсивности в импульсе АЭ из гранитов рапакиви (темные колонки) и куру грей (светлые колонки) при различных температурах образцов

Важной характеристикой последовательностей большого (статистически значимого) числа тех или иных событий является их временная связность, т. е. зависимость последующих событий от уже совершившихся. Эффекты такого рода трактуются как “память” процесса о своей предыстории. Степень связности в нашем случае характеризуется отклонением распределения интенсивностей в последовательности импульсов от случайного распределения, а также временным интервалом между парами событий, в котором проявляются признаки «дальнего» взаимодействия явлений. Одним из статистических инструментов, позволяющих выявить внутреннюю корреляцию процессов, служит так называемый *R/S*-анализ, в котором по характеру соотношения между диапазоном изменений измеряемой величины (в нашем случае — интенсивности сигнала АЭ)

$$R(n) = \max_{1 \leq j \leq n} \left\{ \sum_{i=1}^j |I_i - \bar{I}| \right\} - \min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \sum_{i=1}^j |I_i - \bar{I}| \right\}$$

и ее стандартным отклонением в этом диапазоне

$$S(n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}$$

определяется тенденция текущего процесса; здесь n и \bar{I} — соответственно длина последовательности импульсов с интенсивностью I_j и их среднее значение в окне τ , включающем n импульсов.

Отношение R/S растет с увеличением временного окна по степенному закону:

$$R/S \propto \tau^H,$$

где H — коэффициент Хёрста.

Величина H лежит в диапазоне от 0 до 1; $H > 0.5$ указывает на сохранение тенденции (направления) изменения величин I_j при увеличении окна τ (персистентность процесса); $H < 0.5$ характеризует ситуацию, при которой при увеличении окна τ более вероятным становится “гашение” тенденции. Случай $H = 0.5$ отвечает случайному чередованию интенсивности событий.

Коэффициент H определяется из зависимости R/S от τ , построенной в двойных логарифмических координатах. На рис. 5 показаны примеры таких зависимостей для нескольких температур образца. Можно видеть, что во всех случаях $H > 0.5$, что указывает на влияние предшествующих событий на дальнейшее развитие процесса во временных интервалах до $\sim 10-40$ мкс. Точность определения H составляла 0.01–0.02. Связность событий проявилась в обоих типах гранита, но более подробное сравнение найденных значений коэффициента H для всех нагретых образцов (рис. 6) свидетельствует о различной температурной зависимости корреляции кинетики накопления повреждений в изученных материалах.

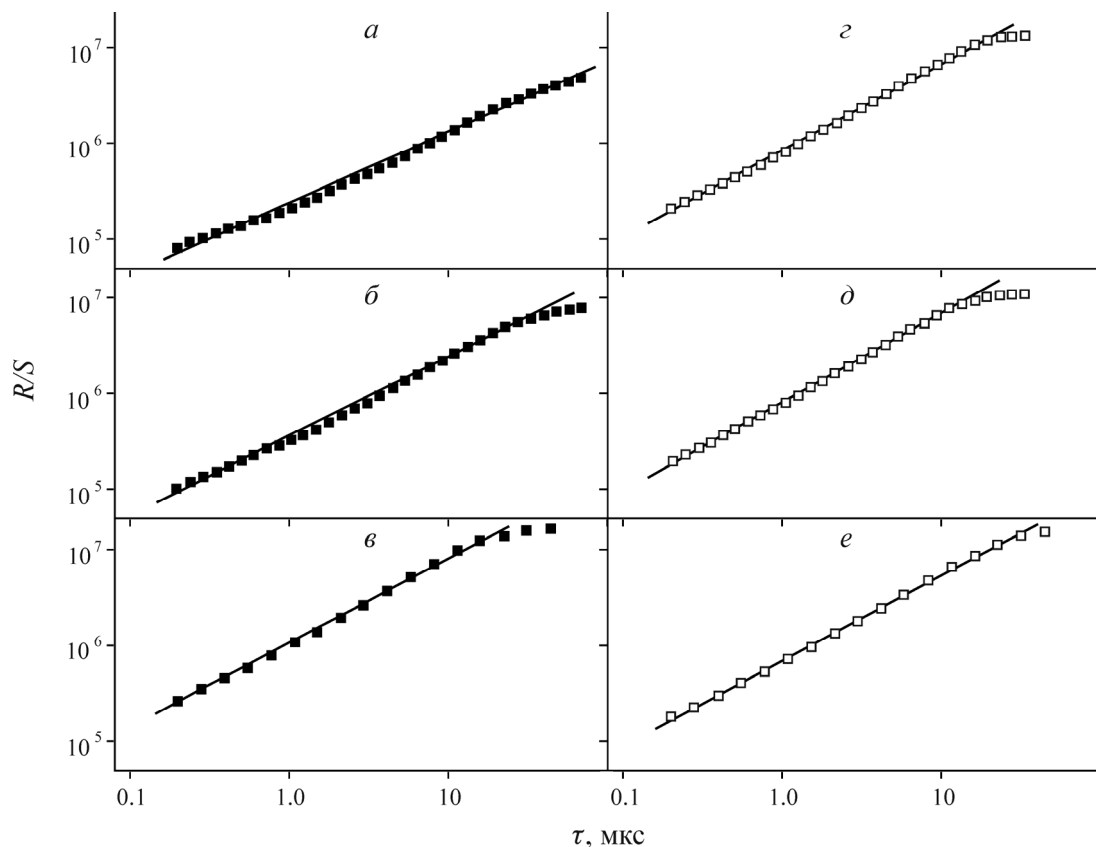


Рис. 5. Результаты R/S -анализа для интенсивности импульсов во временных сериях АЭ ($a-e$ см. на рис. 2). Наклоны прямых участков зависимостей R/S от τ определяют коэффициент Хёрста

На рис. 6 хорошо видно, что коэффициент Хёрста для гранита рапакиви монотонно возрастает с увеличением температуры от 0.73 до 0.93, т. е. связность процесса постоянно растет. В то же время величина H для гранита куру грей растет в области 20–300 °С от 0.84 до 0.93, а затем колеблется без выраженной тенденции к изменению при дальнейшем нагревании образцов.

В принципе, степень корреляции событий должна расти с температурой для всех материалов, поскольку, как видно на рис. 4, с температурой растет энерговыделение при образовании гипоцентров (влияние возникновения более крупной трещины распространяется на большее

расстояние). Однако для этой тенденции имеются структурные ограничения, связанные с высокой неоднородностью горных пород. “Дальние” корреляции реализуются через распространение упругих взаимодействий, для которых границы зерен представляют препятствия — волны динамических взаимодействий отражаются и рассеиваются, а статические напряжения затухают. Поэтому можно полагать, что видимое на рис. 6 различие в температурных зависимостях коэффициента Хёрста связано с зернистостью изученных гранитов. По-видимому, при температуре 600 °С и ниже радиус взаимодействий между трещинами не превышает размер зерна в граните рапакиви, но в более мелкозернистом граните куру грей межзеренные границы уже при 400 °С начинают играть свою роль, препятствуя усилению кооперативных явлений. Влияние размера зерен в гранитах на процессы самоорганизации возникающих гипоцентров наблюдалось методом АЭ в работе [11].

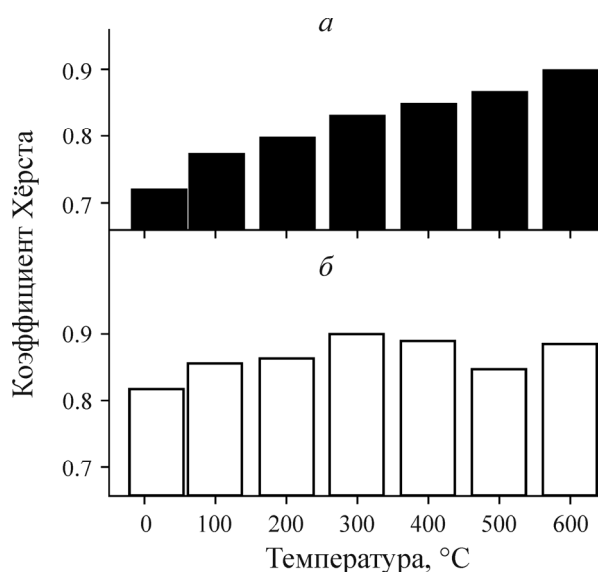


Рис. 6. Гистограммы зависимости коэффициента Хёрста от температуры, рассчитанные из временных серий импульсов АЭ из образцов гранитов рапакиви (а) и куру грей (б)

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что температурные условия оказывают влияние на разрушение гранитов в двух аспектах. Во-первых, энерговыделение при образовании микротрещин многократно возрастает в изученной области температур от 20 до 600 °С; отметим, что это характерные температуры формирования очагов землетрясений на различных глубинах. Абсолютная интенсивность освобожденной энергии зависит от физико-механических свойств материала, но относительный прирост интенсивности процесса в наших опытах оказался мало чувствительным к составу и структуре гранитов.

Во-вторых, кинетика накопления гипоцентров в разрушаемых образцах обладает чертами кооперативного процесса, которые усиливаются с увеличением температуры — коэффициент Хёрста приближается к единице. Эффект “памяти” в сериях импульсов АЭ неоднократно наблюдался при сжимающей деформации горных пород. Проявление этого эффекта при динамическом разрушении гранитов подтверждает ранее полученные свидетельства подобия кинетики накопления повреждений при гидростатической и ударной нагрузках этих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Scholz C. H.** The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seismic. Soc. Am.*, 1968, Vol. 58, No. 1.
2. **Zavyalov A. D., Sobolev G. A.** Analogy in precursors of dynamic events at different scales, *Tectonophys.*, 1988, Vol. 152, No. 3–4.
3. **Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Завьялов А. Д.** Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический процесс // *Физика Земли*. — 1995. — № 1.
4. **Amitrano D.** Variability in the power-law distributions of rupture events, *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2012, Vol. 205, No. 1.
5. **Davidson J., Stanchits S., Dresen G.** Scaling and universality in rock fracture, *Phys. Rev. Lett.*, 2007, Vol. 98.
6. **Геншафт Ю. С.** Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия // *Физика Земли*. — 2009. — № 8.
7. **Lei X., Satoh T.** Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage, *Tectonophys.*, 2007, Vol. 431, No. 1–4.
8. **Kuksenko V., Tomilin N., Chmel A.** The rock fracture experiment with a drive control: A spatial aspect, *Tectonophys.*, 2007, Vol. 431.
9. **Щербаков И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е.** Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // *ФТПРПИ*. — 2012. — № 4.
10. **Куксенко В. С.** Диагностика и разрушение крупномасштабных объектов // *ФТТ*. — 2005. — Т. 47. — № 5.
11. **Kusunose K., Lei X., Nishizawa O., Satoh T.** Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock, *Phys. Earth Plan. Interiors*, 1991, Vol. 67, No. 1–2.

Поступила в редакцию 17/IX 2013